

SRR土壤固化剂改良土壤抗压强度试验研究

邹希全, 刘杰*, 马越, 贺敏

湖南工业大学土木工程学院, 湖南 株洲

收稿日期: 2023年3月2日; 录用日期: 2023年3月23日; 发布日期: 2023年3月31日

摘要

SRR土壤固化剂是一种新型土壤加固材料, 本文基于对湖南省衡阳市锰矿矿渣土壤和株洲市黏性黄土土壤进行最佳含水率测试后, 对比分析SSR土壤固化剂对土壤抗压强度的影响。筛选10 mm以下粒径土壤作为无侧限抗压强度标准小试件, 在3%生石灰、5%的水泥、100 ml/m³ SRR土壤固化剂等不同材料的配合下, 进行无侧限抗压强度对比试验研究。结果表明: SRR固化剂能减少锰渣土的吸水量, 从而提高土壤自身强度, 且提升幅度远高于水泥及生石灰; 对于株洲黏性黄土, 抗压强度的提升较小, 但其强化效果仍强于水泥及生石灰。

关键词

土壤固化剂, 土壤加固, 最佳含水率, 无侧限抗压强度

Experimental Study on the Compressive Strength of Soil Improved by SRR Soil Curing Agent

Xiquan Zou, Jie Liu*, Yue Ma, Min He

College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan

Received: Mar. 2nd, 2023; accepted: Mar. 23rd, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

SRR soil curing agent is a new type of soil reinforcement material. In this paper, we compare and analyze the effect of SSR soil curing agent on the compressive strength of soil based on the optimal moisture content test of manganese mine slag soil in Hengyang City, Hunan Province and clay loess

*通讯作者。

soil in Zhuzhou City. Soil with particle size below 10mm was selected as the standard small specimen of unconfined compressive strength, and a comparative test study of unconfined compressive strength was conducted with different materials such as 3% quicklime, 5% cement and 100 ml/m³ SRR soil curing agent. The results show that SRR curing agent improves the soil's own strength by reducing the water absorption of manganese residue soil, and the improvement is much higher than that of cement and quicklime; for Zhuzhou clay loess, the improvement of compressive strength is smaller, but the strengthening effect is still stronger than that of cement and quicklime.

Keywords

Soil Curing Agent, Soil Reinforcement, Optimum Moisture Content, Unconfined Compressive Strength

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当今世界面临严重的环境问题，主要表现为对自然资源的过度消耗，使生态环境遭到严重破坏，废土渣土无法大量处理，或处理方式不经济，在 2015 年 12 月深圳市恒泰裕工业园渣土收纳场滑坡事故造成 69 人遇难，暴露出城市弃土弃渣这一巨大隐患，并且国内渣土收纳场建设难以满足市场要求，即便在政府规划建设弃渣场的城市，违法弃土弃渣现象依然不断出现[1]，因此土壤固化技术对未来的环境改善、资源利用有着重要地位。

本文采用生石灰、水泥、SRR 土壤固化剂对土壤进行加固改良。以湖南省衡阳市锰矿渣土和株洲是黄黏土为研究对象，对比探究 SRR 土壤固化剂固化效果，以及固化剂的生效方式，来满足道路建设需求。

土壤固化剂加固土体的研究已有几十年的历史，取得了许多土壤固化的实践经验和理论成果。其研究方向大致有固化土的性质和本构模型的研究，以及加固各种类型的土壤固化剂的配比研究[2]。以美国、日本等为代表的国家较早地对土壤固化改良技术展开了深层次研究。一开始的固化材料由单一的石灰、水泥、粉煤灰组成，经过逐步研究，固化材料提升到多种材料的混合，最终形成了能显著提升土壤性能的复合材料——土壤固化剂。主要产品有美国生产的 Soil-rock、EN-1、top-seal 等；澳大利亚的 Roadpacker (r)；日本生产的 Aught-set 系列土壤固化剂；南非生产的 ISS 土壤固化剂、CON-AID 土壤固化剂[3]。虽然国际上包括国内对于土壤固化剂的研究发展较快，但仍然有许多的局限性，只能对单种或少数类型土质能有显著的增强作用，尤其是对于膨胀性黏土，固化剂的改良效果十分有限。

我国对土壤固化的研究相对较短，从 20 世纪 80 年代开始，在吸收国外经验的基础上，我国开始对土壤进行针对性的研究工作，并先后取得了一些研究成果。方祥位等[4]开展了 GT 型土壤固化剂的研究，分析该固化剂加固土的机理，通过试验证明该固化剂改良土的击实效果、抗剪强度、压缩性等工程特性明显优于石灰改良土。同年，侯浩波等[5]在详细介绍 HAS 固化剂(主体原料为矿渣和矿渣组合物)的基本性能及其在灰坝工程、水利水电工程等领域应用的基础上，通过室内试验和对工程应用的分析探讨说明了 HAS 土壤固化剂的适用性，为土料固化技术的开发、推广、应用提供了依据和参考。近几年，杨富民等[6]通过对比法，研究多种材料对 TK-G 土壤固化剂性能的影响，与此同时，发现该固化剂对北京地区的细粒土有良好的固化效果。周业梅等[7]研发了 SSA 固化剂，通过实验与电镜等手段测试了该固化剂与多种土壤相互作用的机理，发现该固化剂能有效改良杂填土。陈飞等[8]研究出减少离子型堆浸场地水土

流失的新型固化剂，并发现了该固化剂与其他材料合适的配比方案来达到良好的固化效果与经济效益。丁永明等[9]以多种土壤为基料，进行了 EFS 土壤固化剂与其他固化材料固化土的配合比试验研究，并发现 EFS 土壤固化剂可以提高土壤的水稳定性。董博闻等[10]用 NS-SL 型土壤固化剂对淤泥质黏土进行固化试验研究，发现固化后的复合土有较好的强度、水稳定性和抗冻性能，适用于滨海地区道路路基工程。

本文采用生石灰、水泥、SRR 土壤固化剂土壤进行加固改良。以湖南省衡阳市锰矿渣土和株洲是黄黏土为研究对象，对比探究 SRR 土壤固化剂固化效果，以及固化剂的生效方式，来满足道路路基的建设需求。

2. 试验用料及最佳含水率测试

2.1. 试验用土参数

试验使用的两种基础土料分别取自湖南省衡阳市锰矿渣土和株洲市黏性黄土，它们的物理指标如表 1 所示。

Table 1. Basic physical parameters of soil samples

表 1. 土样基本物理参数

名称	天然含水率 w (%)	密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	塑性指数
衡阳锰矿渣土	40.1	1.88	23
株洲黄土	27.3	1.75	19.1

2.2. 试验材料

经过试验确定，SRR 固化剂的最佳掺量为 100 ml/m^3 ，所有加固土都掺入 5% 标号 425# 的普通硅酸盐水泥。

锰矿渣土产地：湖南省祁东县归阳工业集聚区。

黄黏土产地：湖南省株洲市天元区。

工业级生石灰，产地：新余，含钙量：约 95%。

普通硅酸盐水泥，标号：425#，厂家：湖南双峰海螺水泥有限公司。

工业级土壤固化剂，牌号：RE-3.0，厂家：湖南路业环保科技有限公司。

2.3. 最佳含水率检测

2.3.1. 检测样土制备

击实试验样品依据技术规范要求，采用轻型击实法制备。选用 $\Phi 100 \text{ mm} \times \Phi 100 \text{ mm}$ 标准的试件。试验方法参照公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG 3430-2020)中的 T 0131-2019 执行。经过粗略估算试验需要 2000 g 素土，将素土放置烘干箱内烘烤 12 小时，并过 20 mm 标准的筛，再经高精度水分测试仪测定含水率后，将锰渣土与株洲黄土分别按照 2% 含水率增加量配置 5 份样土。分别如表 2 与表 3 所示。

Table 2. Manganese slag soil pre-configured sample soil formulations

表 2. 锰渣土预配置样土配方

样品编号	样土 1	样土 2	样土 3	样土 4	样土 5
素土质量(g)	2000	2000	2000	2000	2000
水质量(g)	400	440	460	480	500
理论含水率(%)	22	24	26	28	30

Table 3. Pre-configured sample soil formulations of Zhuzhou loess**表 3.** 株洲黄土预配置样土配方

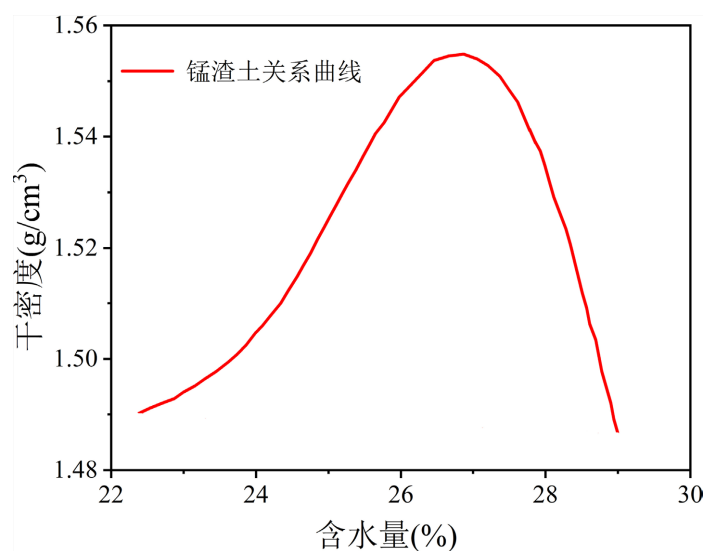
样品编号	样土 1	样土 2	样土 3	样土 4	样土 5
素土质量(g)	2000	2000	2000	2000	2000
水质量(g)	400	440	460	480	500
理论含水率(%)	22	24	26	28	30

2.3.2. 最佳含水率结果

1) 将击实的土块取样, 使用烘干法测得湖南省株洲市锰矿锰渣土的实际含水率, 记录数据。结果如表 4 和图 1 所示。

Table 4. Results of manganese slag soil compaction experiments**表 4.** 锰渣土击实实验结果

样品编号	样土 1	样土 2	样土 3	样土 4	样土 5
平均含水率(%)	22.3	24.3	26.4	27.8	29
干密度(g/cm ³)	1.49	1.51	1.55	1.54	1.49

**Figure 1.** Relationship curve between moisture content and dry density of manganese slag soil**图 1.** 锰渣土含水率与干密度关系曲线

本次轻型击实法得出, 锰渣土的最大干密度为 1.56 g/cm³, 最佳含水率为 26.78%。

2) 将击实的土块取样, 使用烘干法测得湖南省株洲市粘性黄土的实际含水率, 记录数据。结果如表 5 和图 2 所示。

Table 5. Results of Zhuzhou loess compaction experiments**表 5.** 株洲黄土击实实验结果

样品编号	样土 1	样土 2	样土 3	样土 4	样土 5
平均含水率(%)	14.2	16.2	19.5	12.6	24.2
干密度(g·cm ²)	1.67	1.73	1.77	1.65	1.56

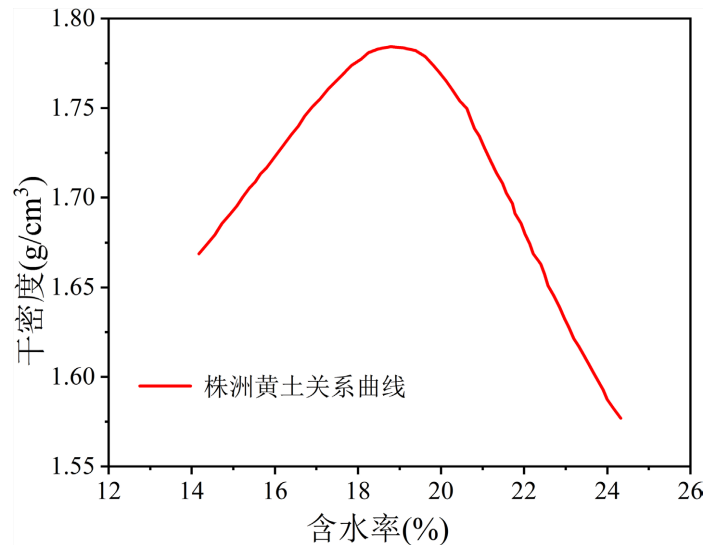


Figure 2. Relationship curve between moisture content and dry density of Zhuzhou loess
图 2. 株洲黄土含水率与干密度关系曲线

本次轻型击实法得出, 株洲黄土的最大干密度为 1.78 g/cm^3 , 最佳含水率为 18.82%。

3. 无侧限抗压强度试验样土制备与测试结果

3.1. 试验样土制备

试验参照公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG 3430-2020)中的 T 0148-1993 执行; 将素土烘干过 10 mm 标准的筛后, 与生石灰拌合均匀, 密封保存 72 小时, 再加入水泥、土壤固化剂以及适量的水, 使改良土的含水率达到前文测得的最佳含水率。将上述混合土搅拌均匀后, 通过液压机压实制作成 $\Phi 50 \text{ mm} * 50 \text{ mm}$ 圆柱体标准土块试件。最后试件在规定的环境下保湿养护 6 天再浸水 1 天后, 进行无侧限抗压强度试验研究。

3.2. 试验结果

对比试验使用的材料为: 5% 的水泥、3% 的生石灰、 100 ml/m^3 SRR 土壤固化剂。通过加入的材料形成对照, 对比研究固化剂对锰渣土和株洲黄土无侧限抗压强度的提升效果。平均结果如表 6 与表 7 所示。

Table 6. Seven-day unconfined compressive strength of manganese slag soil

表 6. 锰渣土的七天无侧限抗压强度

材料类型	泡水前重量(g)	泡水后重量(g)	吸水量(g)	抗压强度(MPa)
5% 水泥	218.17	233.94	15.77	1.502
5% 水泥 + SRR 型固化剂	225.69	227.48	1.79	3.649
5% 水泥 + 3% 生石灰	209.3	222.49	13.19	1.613
5% 水泥 + 3% 生石灰 + SRR 型固化剂	214.96	216.9	1.94	4.132

从表 6 可以发现, 锰渣土的吸水量在掺入固化剂后大幅度减小, 这是因为 SRR 型土壤固化剂经固化可形成均匀的分子网络结构将土壤胶体限定在各自的三维网络结构内, 并用富含的氢键来减弱土方内部吸水性, 从而达到土壤固化的作用。由此, 在都混合了 5% 水泥的情况下, 添加 SRR 固化剂后, 锰渣土

抗压强度提升了 143%，在都混合了 5%水泥和 3%生石灰的情况下，添加固化剂后，锰渣土的抗压强度更是提高了 152%。从表 7 中可知，对于株洲黄土，掺入 SRR 固化剂后，其吸水量也略有下降的同时，抗压强度有小幅提升。

Table 7. Seven-day unconfined compressive strength of Zhuzhou loess

表 7. 株洲黄土的七天无侧限抗压强度

材料类型	泡水前重量(g)	泡水后重量(g)	吸水量(g)	抗压强度(MPa)
5%水泥	232.57	248.37	16.8	0.34
5%水泥 + SRR 型固化剂	240.58	250.89	10.3	0.40
5%水泥 + 3%生石灰	226.11	212.21	13.9	0.36
5%水泥 + 3%生石灰 + SRR 型固化剂	229.14	219.34	9.8	0.46

SRR 固化剂主要采用了抗水性自修复土壤固化技术，利用淤泥土、矿渣等废弃渣土加上一定配合比的水泥、生石灰，经拌合、摊铺、压实形成加固土。其主要成分包括离子型高分子有机物、自修复微胶囊、无机盐、分散剂、固化催化剂等。该固化剂不仅能减少土壤的吸水量，还能利用有机物与土颗粒的各种反应改善土壤颗粒表面的化学性质来提高土体颗粒间的相互黏结作用，从而改善土壤的原有性质，并使之成为工程建设中能够利用的筑路材料。与此同时，当硬化后的土方受到应力开裂时，大量富含活性物质的微胶囊会破裂，胶囊内部的修复剂流出扩散至损伤处，并与预混合的催化剂接触，在加热条件下实现固化起到黏结裂缝的功能和裂缝自我修复的功能。

4. 结论

综合对比锰渣土及株洲黄土七天无侧限抗压结果，可获得如下几条主要结论：

1) 在锰矿渣土的范围内，由于 SRR 型固化剂自身具有抗水性自修复的作用，土颗粒、水泥和土壤固化剂在混合搅拌的过程中发生了物理化学反应，土壤的吸水量大幅度减少，仅为原素土的 12%~15%。由于吸水量的大幅度减少，土壤自身强度获得大幅度提升，且提升效果远强于只添加水泥及生石灰。

2) 在黏性黄土的范围内，SRR 型固化剂的使用使素土的无侧限抗压强度略有提升，但不显著。

3) 在塑性指数大于 17 的黏性黄土范围内，土壤改良材料对原素土无侧限抗压强度增强的影响程度为：SRR 型固化剂 > 生石灰 > 水泥。

SRR 土壤固化剂是一种优良的土壤加固材料，尤其对衡阳锰矿渣土取得较为满意的结果，对其他土壤的固化作用需进行进一步探索。在实际工程中，应注意不同施工要求及土壤情况，对固化剂添加方案作进一步探讨，更好地应用于工程实际。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(NO: 51978260)。

参考文献

- [1] 刘宇, 税创新, 韩国平. 变弃土弃渣为土石资源缓解城市渣土围城困局的思考[J]. 中国水利, 2018(2): 38-39.
- [2] 赵明华, 李刚, 曹喜仁, 等. 土力学地基与基础疑难释义[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 142-143.
- [3] 陈胜. 公路路基土壤固化剂的设计、应用与机理研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2006.
- [4] 方祥位, 孙树国, 陈正汉, 等. GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1545-1548.
- [5] 侯浩波, 周雯, 张大捷, 等. HAS 土壤固化剂固化土料的特性及工程应用[J]. 工业建筑, 2006, 36(7): 31-33.

- [6] 杨富民, 何军利, 等. TK-G 型液体土壤固化剂的研制及其固化机理[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 242-246.
- [7] 周业梅, 梅启林, 丁国民. SSA 土壤固化剂改良杂填土的影响机理[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(12): 22-28.
- [8] 陈飞, 张仕彬, 谢蕴忠, 等. 离子型稀土堆浸场地复合土壤固化剂正交试验研究[EB/OL]. 有色金属科学与工程: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.tf.20230224.1404.004.html>, 2023-02-27.
- [9] 丁永明, 张春东, 苗华, 等. EFS 固化不同土质道路基层水稳定性与经济性研究[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(21): 92-95.
- [10] 董博闻, 王修山, 周恒宇. 应用 NS-SL 型土壤固化剂固化淤泥的路用性能试验研究[J]. 公路, 2021, 66(8): 13-17.